

文章编号: 1000-2472(2005)04-0006-06

## 带圆钢管的劲性高强混凝土 轴压短柱的承载力及可靠度分析\*

陈周熠<sup>1,2</sup>, 易伟建<sup>1</sup>, 赵国藩<sup>3</sup>, 沙镇平<sup>2</sup>, 林立岩<sup>4</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 厦门大学 土木工程系, 福建 厦门 361005;

3. 大连理工大学 土木工程系, 辽宁 大连 116024;

4. 辽宁省建筑设计研究院, 辽宁 沈阳 110005)

**摘要:** 为了探求一个合理的设计公式来计算带圆钢管的劲性高强混凝土柱在轴压下的极限强度, 完成了包含13个短柱试件在内的轴心受压试验以研究该类柱在轴压下的破坏模式和极限强度. 试验结果表明, 在荷载作用下, 直到荷载接近极限值时, 柱中钢管、纵向钢筋以及混凝土三者之间的纵向应变基本上是协调的, 计算结果与试验结果吻合良好, 因此可以采用叠加原理来计算带圆钢管的劲性高强混凝土柱在轴压下的极限承载力. 此外, 分析了该极限承载力计算公式的可靠度水平. 分析结果表明, 该承载力计算满足GB 50068-2001对构件可靠指标的要求.

**关键词:** 高强混凝土; 劲性混凝土柱; 轴压; 可靠度

**中图分类号:** TU375.3

**文献标识码:** A

## Ultimate Strength of High Strength Concrete Columns Reinforced with Concrete Filled Steel Tube Under Axial Compression and their Reliability Analysis

CHEN Zhou-yi<sup>1,2</sup>, YI Wei-jian<sup>1</sup>, ZHAO Guo-fan<sup>3</sup>, SHA Zheng-ping<sup>2</sup>, LIN Li-yan<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Department of Civil Engineering, Xiamen Univ, Xiamen, Fujian 361005, China;

3. Department of Civil Engineering, Dalian Univ of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

4. Liaoning Provincial Building Design & Research Institute, Shenyang, Liaoning 110005, China)

**Abstract:** This paper aims at developing a rational design formula to predict the ultimate strength of high strength concrete columns reinforced with concrete filled steel tube (HSCCRST) under axial compression. In order to investigate the failure mode and the ultimate strength of the columns under axial compression, experimental tests of 13 specimens under axial compression were performed. Test results showed that the longitudinal strain of the steel tube, the longitudinal reinforcement, and the concrete in the column were all compatible under loading until the load applied was close to the ultimate load. Therefore, the ultimate strength of HSCCRST could be calculated in the principle of superposition. In addition, the reliability level of the columns under axial compression designed following the proposed formula was investigated. Analysis results indicated that the reli-

\* 收稿日期: 2004-05-10  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50378034)  
作者简介: 陈周熠(1974-), 男, 福建南平人, 湖南大学博士  
E-mail: zychen\_1999@yahoo.com.cn

bility indexes of the columns designed following the proposed formula satisfied the demand of Unified Standard for Reliability Design of Building Structures (GB 50068-2001), National Standard of the People's Republic of China.

**Key words:** high strength concrete; composite steel concrete columns; axial compression; reliability

在现代工程结构的发展中,人们不断利用“组合”的概念来实现结构形式的突破.辽宁省建筑设计研究院在设计实践过程中,借鉴劲性钢筋混凝土的思考方法,提出了把钢管高强混凝土放在普通高强混凝土柱断面中间的组合形式,其实质是以圆钢管为钢骨的劲性高强混凝土柱(习惯上称之为钢管高强混凝土核心柱)<sup>[1]</sup>.已有的试验研究<sup>[2,3]</sup>和工程实践都表明,这种柱型既能发挥高强混凝土强度高的优点,又可以有效地改善普通高强混凝土柱延性差的弱点,有很好的研究和应用前景.为了进一步加深对钢管高强混凝土核心柱的理解和应用,本文在钢管高强混凝土核心轴压短柱的试验基础上,讨论了这类轴压短柱的承载力计算方法,并对其可靠度进行分析.

1 试验概况<sup>[4]</sup>

1.1 试验模型及参数

本次试验的试件共 13 个,包括 8 个钢管高强混凝土核心短柱、4 个钢管高强混凝土短柱和 1 个普

通高强混凝土短柱,其截面形式如图 1 所示.其中钢管高强混凝土核心短柱和普通高强混凝土短柱的试件尺寸为 200 mm×200 mm×600 mm,钢管高强混凝土短柱的柱高则为 400 mm.各试件参数详见表 1,变化的主要参数为钢管壁厚.试件所用不同厚度的钢管由天津津满钢管厂生产的无缝钢管经车削加工而成.其实测屈服强度为 270 MPa,所用 Φ10 钢筋的屈服强度为 391 MPa,Φ6 钢筋为 316 MPa,混凝土强度由在同条件下成型养护的 150 mm 立方体试块试验得出.为测定各试件中钢管的应变,在钢管的中部对称位置粘贴了 4 对应变片,每对应变片纵、环向各一.为得到核心柱中纵筋与箍筋应变,在对角两根纵筋和中部的两根箍筋上各贴一应变片.为测定核心柱外围混凝土的应变值,在核心柱中部对称位置沿纵向粘贴了 4 个混凝土应变片.另外,沿试件的纵向还设置了两个电测位移计以量测柱身的纵向总变形.试件是在 5 000 kN 试验机上进行轴心加载,采用分级加载,每级荷载为预估极限荷载的(1/10~1/15).当试件接近极限荷载后,则采用连续加载直至破坏.

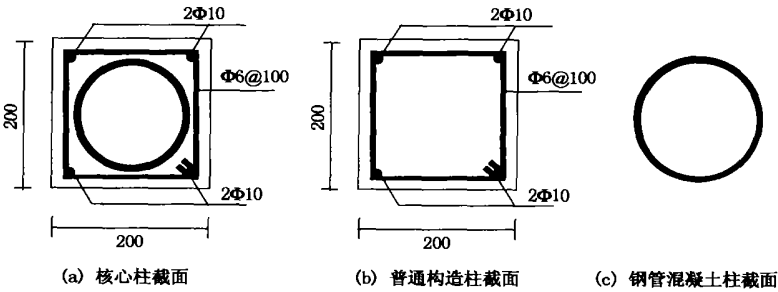


图 1 试件的截面形状  
Fig. 1 Cross-section of column specimens

1.2 试验结果

图 2 为不同钢管壁厚系列的钢管高强混凝土核心短柱试件 A1-1, B1-2, C1-1, D1-1, 以及未设置核心钢管的试件 E1-1 的  $N/N_u$  纵向应变的关系曲线(其它试件的曲线未一一列出,可参见文献

[4]),其中  $N_u$  为极限承载力试验值,即试验中得到的最大荷载值.

通过试验观察,结合应变计读数变化,核心短柱的破坏过程可分段描述如下:(1) OA 段为弹性阶段,这一阶段钢管、纵筋及箍筋对试件受力影响很小,试件外观无异常变化;(2) AB 段为弹塑性阶段,

纵向应变发展较快,混凝土保护层开始出现可见竖向裂缝,在此阶段末期,箍筋和钢管环向的应变增长也明显加快;(3)BC段,随着荷载的增长,裂缝很快扩展,混凝土保护层开始部分脱落,箍筋和钢管环向应变迅速增大,对核心混凝土的约束增强.在这一阶段末期,试件达到其峰值荷载,部分箍筋和钢管开始

屈服;(4)CD段为下降段,经峰值点C以后,荷载下降,混凝土保护层开始大片剥落,箍筋和钢管大部屈服,纵筋压屈,试件破坏.至于普通构造柱以及钢管混凝土短柱试件,本次试验观察到的破坏形式与文献[5-8]中所描述的相似,具体可参见文献[4].

表 1 试件的参数及试验结果

Tab. 1 Parameters of test specimens and test results

柱型式	试件编号	$f_c/f_c$ M Pa	$D \times t$ / mm $\times$ mm	$\xi$	$N_u^t$ / kN	$N_u^c$ / kN	$N_u^t/N_u^c$
核心柱	A1-1	49.2	127 $\times$ 1.5	0.268	2 510.5	2 332.7	1.076
	A1-2	49.2	127 $\times$ 1.5	0.268	2 447.1	2 332.7	1.049
	B1-1	51.2	129 $\times$ 2.5	0.434	2 850.0	2 586.7	1.102
	B1-2	51.2	129 $\times$ 2.5	0.434	2 992.0	2 586.7	1.156
	C1-1	50.2	131 $\times$ 3.5	0.624	2 594.0	2 725.5	0.952
	C1-2	50.2	131 $\times$ 3.5	0.624	2 761.0	2 725.5	1.013
	D1-1	49.4	133 $\times$ 4.5	0.822	2 842.0	2 876.2	0.988
	D1-2	49.4	133 $\times$ 4.5	0.822	2 906.0	2 876.2	1.010
核心柱 $N_u^t/N_u^c$ 的均值和方差					$n=8, \sigma=0.062, \bar{x}=1.043$		
普通构造柱	E1-1	49.2	无	0	2 266.0	2 075.3	1.091
	A2-1	49.2	127 $\times$ 1.5	0.268	958.0	880.7	1.087
	B2-1	51.2	129 $\times$ 2.5	0.434	1 297.0	1 101.1	1.170
	C2-1	50.2	131 $\times$ 3.5	0.624	1 400.0	1 287.1	1.087
	D2-1	49.4	133 $\times$ 4.5	0.822	1 538.0	1 479.2	1.039
钢管砼柱 $N_u^t/N_u^c$ 的均值和方差					$n=4, \sigma=0.047, \bar{x}=1.095$		

注:  $D, t$  为钢管的外径、壁厚;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度值, 是由实测的立方体抗压强度  $f_{cu}$  换算得到;  
 $\xi=(A_s f_{st})/(A_c f_{c1})$  为核心钢管混凝土的套箍系数;  $A_s, f_{st}$  分别为钢管的横截面积和屈服强度;  $A_c, f_{c1}$  分别为钢管核心混凝土的横截面积和轴心;  $N_u^t$  为试件实测极限荷载;  $N_u^c$  为试件计算极限荷载.

核心钢管, 延性得到改善. 从试件 A1-1 到 D1-1, 随着核心钢管壁厚的增加, 变形曲线的下降段趋于平缓, 表现出较好的延性, 说明核心钢管的存在, 改善了高强混凝土短柱的轴压性能.

对于钢管高强混凝土核心短柱而言, 其纵向含钢率一般较高, 因此核心钢管的埋置能否保证与混凝土共同工作是一个很重要的问题. 图 3 是试件 D1-1 的  $N/N_u$  各部分纵向应变的关系曲线. 从曲线可以看出, 在荷载作用下, 柱中钢管、纵向钢筋以及外围混凝土三者之间的变形基本上是一致的. 这种变形协调在低应力阶段更为突出, 此后, 随着应力增长, 各部分之间的变形差异增大, 但直到接近极限荷载时也没有发现各部分有完全分离的现象. 本次试验所有的核心柱试件得到的曲线都表现出了类似的特征, 因此, 通过试验, 可以得出钢管高强混凝土核心轴压短柱在轴向荷载作用下, 钢材与混凝土之间是可以共同工作直至破坏的.

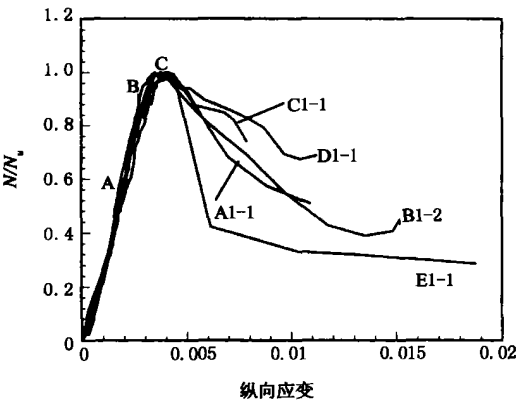


图 2 钢管高强混凝土核心短柱  $N/N_u$  应变关系  
Fig. 2  $N/N_u$  versus longitudinal strain for specimens of HSCCRST

从图 2 的变形曲线可以看出, 未配置核心钢管的试件 E1-1, 其变形曲线的下降段比较陡峭, 表现出较大的脆性. 相比之下, 核心短柱试件由于配置了

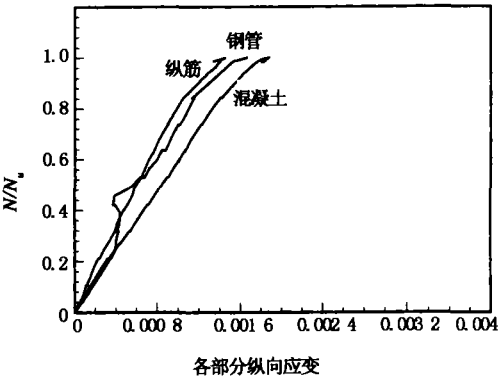


图 3 核心短柱 D1- 1 试件  $N/N_u$  各部分应变关系  
Fig. 3  $N/N_u$  versus longitudinal strain of different portion for specimen D1- 1

2 极限承载力计算

钢管高强混凝土核心柱横截面可以看成由核心钢管混凝土和外围钢筋混凝土两部分组成. 由前述讨论可知, 这两部分在轴向荷载作用下, 可以共同工作直至破坏, 所以能够用叠加原理来计算它的轴心受压承载力. 计算时把钢管高强混凝土核心短柱分为核心钢管混凝土和外围钢筋混凝土两部分.

对于核心钢管混凝土部分的强度计算, 文献[ 7, 8] 在试验的基础上, 提出的钢管高强混凝土的计算公式为:

$$N_u = A_g f_c (1 + 1.8 \xi) \tag{1}$$

式中,  $\xi$  为套箍系数,  $\xi = f_{st} A_{st} / f_{c1} A_c$ ;  $f_{st}$ ,  $A_{st}$  为分别为钢管的屈服强度和截面面积;  $f_c$ ,  $A_c$  为分别为混凝土的轴心抗压强度和截面面积.

本次试验中的钢管高强混凝土柱试件用公式 (1) 计算的结果见表 1, 试验值与计算值之比的均值  $\bar{x} = 1.095$ , 方差  $\sigma = 0.047$ , 说明核心钢管混凝土部分选用式 (1) 计算是合适的.

至于外围钢筋混凝土部分, 虽然箍筋有增强其所约束混凝土强度的作用, 但矩形箍筋的约束效果在正常荷载作用下并不明显, 因此在计算外围钢筋混凝土部分的承载力时可不考虑其效应, 并按下列公式计算:

$$N_u^{\text{外}} = A_{c2} f_{c2} + f_{sy}' A_s' \tag{2}$$

式中,  $A_{c2}$ ,  $f_{c2}$  分别为钢管外围混凝土的横截面积和轴心抗压强度;  $A_s'$ ,  $f_{sy}'$  分别为纵向钢筋的横截面积和屈服强度.

由公式 (1) 和 (2) 进行叠加, 钢管高强混凝土核心短柱的计算表达式可写为:

$$N_u = A_{c1} f_{c1} (1 + 1.8 \xi) + A_{c2} f_{c2} + f_{sy}' A_s' \tag{3}$$

式中,  $A_{c1}$ ,  $f_{c1}$  分别为钢管核心混凝土的横截面积和轴心抗压强度;  $\xi$  为核心钢管混凝土的套箍系数,  $\xi = A_s f_{st} / A_{c1} f_{c1}$ .

利用上述公式 (3) 对核心短柱试件 (包括未设置核心钢管的 E1- 1 试件) 进行计算, 结果见表 1. 试验值和计算值比值的均值  $\bar{x} = 1.043$ , 方差  $\sigma = 0.062$ , 计算值与试验值吻合较好, 表明用公式 (3) 计算钢管高强混凝土核心柱的轴心受压承载力是合理的.

3 极限承载力计算的可靠度分析

3.1 极限状态方程

对于钢管高强混凝土核心柱构件, 其承载力极限状态方程为

$$g = R - S_G - S_L = 0 \tag{4}$$

式中,  $R$  为抗力, 服从对数正态分布;  $S_G$  为永久荷载效应, 服从正态分布;  $S_L$  为可变荷载效应, 服从极值 I 型分布.

相应的设计表达式为

$$\gamma_G S_{GK} + \gamma_L S_{LK} \leq R_d \tag{5}$$

式中,  $S_{GK}$  和  $S_{LK}$  分别为永久荷载效应和可变荷载效应的标准值;  $R_d$  为构件承载力设计值, 按极限承载力计算公式 (3) 计算得到;  $\gamma_G$  和  $\gamma_L$  分别为永久荷载和可变荷载的分项系数, 按荷载规范的规定采用,  $\gamma_G$  取 1.2,  $\gamma_L$  取 1.4.

3.2 荷载和抗力统计参数

在进行可靠度分析前, 必须确定有关计算变量的统计参数. 决定构件可靠度的因素是荷载综合效应和构件综合抗力, 而对荷载效应和构件抗力起主要影响的有荷载变异性、计算模式不定性、材料性能不定性及构件几何参数不定性.

在分析结构的可靠度时, 要考虑各种荷载效应的组合情况. 通常取如下三种最常见的荷载效应组合: 即  $S_G + S_{L办}$ ,  $S_G + S_{L住}$  和  $S_G + S_{L风}$ . 这里,  $S$  为荷载效应, 下标  $G$ ,  $L$  和  $W$  分别代表永久荷载、可变荷载和风荷载, 下标“住”指住宅建筑的楼面活荷载, “办”指办公室活荷载. 表 2 中列出了恒载和各活载的统计参数. 计算模式不定性是根据钢管高强混凝土核心柱轴压构件承载力实测值和计算值的比值来确定, 按照概率统计的方法, 计算平均值和变异系数, 由此得出

计算模式不定性系数的平均值( $\mu_p$ )和变异系数( $\delta_p$ ). 这一结果已经在前文讨论给出, 这里也将其列

表 2 荷载和抗力统计参数

Tab. 2 Statistical parameters of load and resistance

项目	基本变量	符号	平均值 标准值 $K$	变异系数 $\delta$
荷载变异性	恒载	$S_G$	1.060	0.070
	办公室活载	$S_{L办}$	0.700	0.290
	住宅活载	$S_{L住}$	0.859	0.233
	风荷载	$S_w$	0.999	0.193
计算模式不定性	轴压计算公式不定性系数	$P$	1.043	0.059
材料性能不定性	C50 砼	$f_c$	1.320	0.135
	Q235 钢材	$f_s$	1.080	0.080
	HRB335 钢筋	$f'_s$	1.140	0.070
构件几何参数不定性	钢管面积	$A_s$	1.000	0.050
	钢筋砼构件截面宽度和高度	$b, h$	1.000	0.020
	纵筋截面面积	$A'_s$	1.000	0.030

本文在分析可靠度时选用 Q235 材质的钢管, HRB335 级纵向钢筋及 C50 级混凝土, 其材料性能不定性的统计参数, 以及分析可靠度还须确定的构件几何参数的不定性统计参数都可参考文献[ 9-12] 提供的参数取值, 一并在表 2 中列出.

3.3 可靠度分析

在给定承载力极限状态方程, 确定了有关计算变量的统计参数后, 即可进行钢管高强混凝土核心柱轴压下的可靠度分析. 考虑工程上比较有代表性的情况, 本文在进行可靠度分析时, 选取的基本参数为: Q235 材质的钢管, C50 级混凝土, HRB335 级纵向钢筋; 柱截面宽  $b=1000\text{ mm}$ , 柱截面高  $h=1000\text{ mm}$ , 钢管外径  $D=500\text{ mm}$ , 钢管壁厚  $t=12\text{ mm}$ ; 钢管外围混凝土的纵向钢筋面积按照钢管外围混凝土面积的 1% 配置. 计算时, 考察了在钢管外径  $D$  不变的情况下, 不同钢管壁厚(对应不同的含钢率  $\alpha$ )对可靠度的影响; 以及在钢管含钢率相近的情况下, 不同外径钢管的配置对可靠度的影响. 在计算可靠度时, 还需要考虑可变荷载效应与永久荷载效应比值  $\rho= S_{LK}/S_{GK}$  不同时的影响, 因为可变荷载与永久荷载的变异性不同,  $\rho$  值改变时, 可靠度也将随之改变.

图4~ 6 分别给出了组合活载类别、钢管外径  $D$  不变情况下不同的含钢率以及钢管含钢率相近情况下不同钢管外径  $D$  随荷载效应比值  $\rho$  变化的

关系曲线. 由这些曲线可以看出, 可靠度指标  $\beta$  随荷载效应比值  $\rho$  的增大而减小, 这是由于活荷载的变异性比恒荷载的变异性大的缘故. 组合活载类别对可靠度的影响则由图 4 可以看出, 当恒载和各种活载组合时, 以和办公室活载组合的情况下  $\beta$  值最高, 住宅活载次之, 风荷载最低. 由图 5 和图 6 可以看出(图中的  $\beta$  值为三种活载组合下可靠度的均值), 在钢管外径  $D$  不变情况下随含钢率的提高, 以及在含钢率相近情况下随钢管外径  $D$  的减小, 可靠度指标  $\beta$  值相应减小, 但这两者对  $\beta$  值的影响较之荷载效应比值和组合活载类别对  $\beta$  值的影响要小得多.

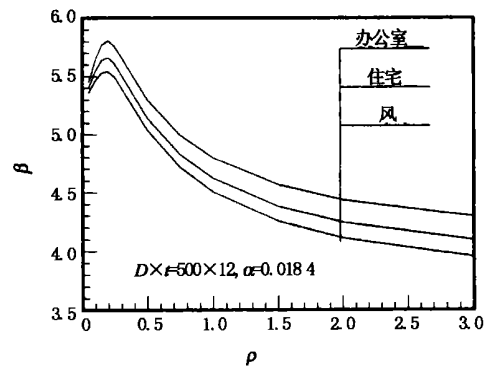


图 4 活载组合类别对  $\beta$  的影响  
Fig. 4 Effect of live load combination on  $\beta$

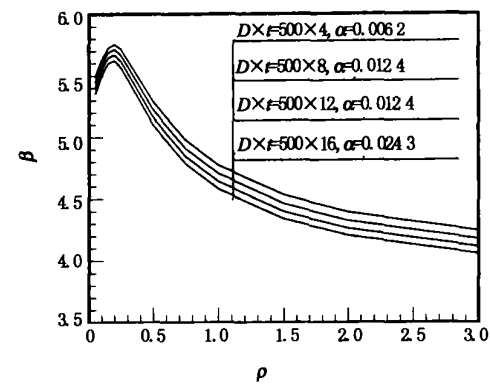
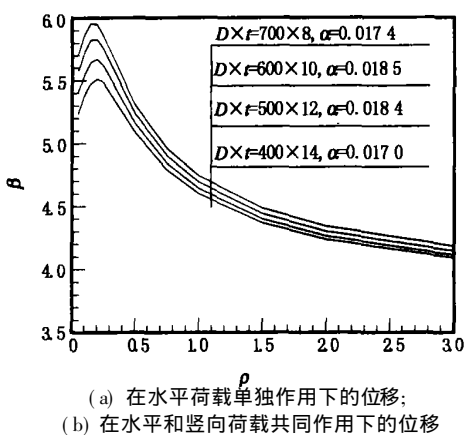


图 5 含钢率对  $\beta$  的影响  
Fig.5 Effect of steel content on  $\beta$



(a) 在水平荷载单独作用下的位移;  
(b) 在水平和竖向荷载共同作用下的位移

图 6 钢管外径对  $\beta$  的影响  
Fig.6 Effect of outside diameter of steel tube on  $\beta$

《建筑结构可靠度设计统一标准》<sup>[13]</sup> 规定, 一般建筑物结构构件承载能力极限状态的可靠指标, 对延性破坏构件为 3.2, 对脆性破坏构件为 3.7. 钢管高强混凝土核心柱作为承压构件, 其可靠指标要求应为 3.7. 由以上的图表分析可以看出, 钢管高强混凝土核心柱在轴压下的可靠度均不小于 3.7, 满足文献[13]对可靠指标的要求.

4 结 论

核心钢管的存在, 改善了高强混凝土短柱的轴压性能, 随着核心钢管壁厚的增加, 带圆钢管的劲性

高强混凝土轴压短柱的延性随之增大. 在轴向荷载作用下, 带圆钢管的劲性高强混凝土轴压短柱中的混凝土与钢管能够共同工作直到破坏. 其极限强度可以用叠加原理计算, 采用公式(3) 计算其承载力, 计算值与试验值吻合良好. 可靠度分析的结果也表明, 该承载力计算的可靠指标大于 3.7, 符合文献[13]的要求.

参考文献

[1] 林立岩. 高强混凝土柱的设计回顾与探讨 [A]. 高强混凝土及其应用第二届学术讨论会论文集 [C]. 南京: 东南大学, 1995: 191- 194.

[2] 赵国藩, 张德娟, 黄承逵. 钢管砼增强高强砼柱的抗震性能研究 [J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(6): 766- 795.

[3] 张德娟. 以钢管混凝土为核心的钢管高强混凝土柱的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学土木工程系, 1995.

[4] 陈周熠. 钢管高强混凝土组合柱的设计计算方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学土木工程系, 2002.

[5] CUSSON D, PAULTRE P. High strength concrete columns confined by rectangular ties [J]. J Struct Engrg ASCE, 1994, 120(3): 783- 804.

[6] KENJI Sakino, HIROYUKI Nakahara, SHOSUKE Morino, et al. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns [J]. J Struct Engrg ASCE, 2004, 130(2): 180- 188.

[7] 顾维平, 蔡绍怀, 冯文林. 钢管高强混凝土的性能与极限强度 [J]. 建筑科学, 1991, 27(1): 19- 25.

[8] 谭克锋, 蒲心诚, 蔡绍怀. 钢管超高强混凝土的性能与极限承载力的研究 [J]. 建筑结构学报, 1999, 20(2): 10- 15.

[9] 韩林海. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[10] 李国强, 黄宏伟, 郑步全. 工程结构荷载与可靠度设计原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[11] 洪敦枢. 钢筋混凝土结构可靠度 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1991.

[12] 唐昌辉, 易伟建, 沈蒲生. 混凝土轴心受压柱的可靠性研究 [J]. 湖南大学学报, 2003, 30(1): 97- 100.

[13] GB 50068- 2001, 建筑结构可靠度设计统一标准 [S].